

doi: 10.12097/gbc.2024.07.033

郭国强, 刘锋, 陈治国, 姚铮, 王润生, 王冉, 陈方博, 高晓丰, 张大明, 胡东宁, 方磊, 刘维涛. 2025. 胶西北石墨矿覆盖区金矿综合物探找矿方法和应用效果[J]. 地质通报, 44(9): 1662–1672.

Guo Guoqiang, Liu Feng, Chen Zhiguo, Yao Zheng, Wang Runsheng, Wang Ran, Chen Fangbo, Gao Xiaofeng, Zhang Daming, Hu Dongning, Fang Lei, Liu Weitao. 2025. Comprehensive geophysical exploration methods and application effects for gold deposits in the graphite covered area of Northwest Jiaodong[J]. Geological Bulletin of China, 44(9): 1662–1672(in Chinese with English abstract).

胶西北石墨矿覆盖区金矿综合物探找矿方法和应用效果

郭国强^{1,2,3}, 刘锋^{1,2,3}, 陈治国^{1,2,3}, 姚铮^{1,2,3}, 王润生^{1,2,3}, 王冉^{1,2,3}, 陈方博⁴,
高晓丰^{1,2,3}, 张大明⁵, 胡东宁^{1,2,3}, 方磊^{1,2,3}, 刘维涛^{1,2,3}

(1. 山东省物化探勘查院, 山东 济南 250013; 2. 山东省地质勘查工程研究中心, 山东 济南 250013; 3. 地下资源环境高精度探测山东省工程研究中心, 山东 济南 250013; 4. 中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院, 北京 100083;
5. 河北省煤田地质局物测地质队, 河北 邢台 054000)

摘要:【研究目的】招平成矿带是胶西北地区重要的导矿构造, 成矿地质条件优越。在招平成矿带南墅地区, 金矿床隐伏在石墨矿之下, 由于石墨矿具有极低的电阻率性质, 屏蔽了一些电磁法的电磁信号向下穿透, 致使电磁信号止于石墨矿部位, 无法探测隐伏于石墨矿下的金矿床。为了厘清南墅地区金矿床的深部赋存及成矿特征, 更好地指导该区下一步金矿找矿方向, 需精选有效可行的物探勘探方法。【研究方法】利用常规重磁电法及新技术广域电磁法、地微动天然源面波法、频谱激电法等综合物探找矿方法对石墨矿极低阻屏蔽区深部金矿进行综合分析研究。【研究结果】优选了石墨矿覆盖区金矿综合物探精细找矿方法, 确定了多源数据融合视角下招平成矿带的平面及深部空间展布特征, 圈定出金矿激电异常位置。【结论】通过钻探揭露剖析, 验证了所推断金矿异常位置的准确性, 实现了极低阻屏蔽区深部找矿新突破。

关键词: 招平成矿带; 金矿; 南墅地区; 极低阻屏蔽区; 综合物探; 矿产勘查工程; 胶西北

创新点: 在招平成矿带石墨矿覆盖区, 通过优选综合物探找矿方法, 克服了极低阻石墨矿对电磁信号的屏蔽影响, 解决了石墨矿覆盖区下金矿找矿的技术瓶颈, 实现了较好的找矿效果。

中图分类号: P618.51; P631 文献标志码: A 文章编号: 1671-2552(2025)09-1662-11

Comprehensive geophysical exploration methods and application effects for gold deposits in the graphite covered area of Northwest Jiaodong

GUO Guoqiang^{1,2,3}, LIU Feng^{1,2,3}, CHEN Zhiguo^{1,2,3}, YAO Zheng^{1,2,3}, WANG Runsheng^{1,2,3},
WANG Ran^{1,2,3}, CHEN Fangbo⁴, GAO Xiaofeng^{1,2,3}, ZHANG Daming⁵, HU Dongning^{1,2,3},
FANG Lei^{1,2,3}, LIU Weitao^{1,2,3}

(1. Shandong Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Jinan 250013, Shandong, China; 2. Shandong Provincial Engineering Research Center for Geological Prospecting, Jinan 250013, Shandong, China; 3. Shandong Engineering Research Center of Underground Resources and Environment High Precision Detection, Jinan 250013, Shandong, China; 4. School of Geophysics and

收稿日期: 2024-07-15; 修订日期: 2025-05-12

资助项目: 山东省重点研发计划项目《金属深部协同探测技术装备》(编号: 2023CXGC011001)、山东省省级地质勘查项目《招平带金矿资源潜力调查及深部远景预测研究》(编号: 鲁勘字(2016)73 号)、《山东省莱州市朱桥地区可控源音频大地电磁测深勘查》(编号: 鲁勘字(2012)12 号)、《胶东金矿深部协同三维精细探测技术研究与找矿预测》(编号: 鲁勘字(2024)68 号)

作者简介: 郭国强 (1980-), 男, 高级工程师, 从事深部地球物理新技术新方法的应用与研究。E-mail: gsr211@163.com

Information Technology, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083; 5. Geophysical Survey Team of Hebei Province Coal Geological Bureau, Xingtai 054000, Hebei, China)

Abstract: [Objective] Zhaoping metallogenic belt is an important ore conducting structure in the northwestern region of Jiaodong, with superior geological conditions for mineralization. In the Nanshu area of the Zhaoping metallogenic belt, gold deposits are hidden beneath graphite deposits. Due to the extremely low electrical resistivity of graphite deposits, some electromagnetic signals from electromagnetic methods are shielded from penetrating downwards, resulting in electromagnetic signals stopping at the graphite deposit site and making it impossible to detect gold deposits hidden beneath graphite deposits. In order to clarify the deep occurrence and mineralization characteristics of the gold deposits in Nanshu area and better guide the next step of gold exploration in the area, feasible and effective geophysical exploration methods need to be selected. [Methods] This article aims to comprehensively analyze and study deep gold deposits in graphite ore extremely low resistance shielding areas through the use of conventional gravity magnetic method and new technologies such as wide area electromagnetic method, microseismic natural source surface wave method, and spectral induced polarization method. [Results] A comprehensive geophysical fine prospecting method for gold deposits in graphite ore-covered areas was optimized. The planar and deep spatial distribution characteristics of the Zhaoping metallogenic belt from the perspective of multi-source data fusion were determined, and the locations of induced polarization anomalies for gold deposits were delineated. [Conclusions] Through drilling and analysis, the accuracy of the inferred location of the gold induced polarization anomaly has been verified, achieving a new breakthrough in deep mineral exploration in extremely low resistance shielding areas.

Key words: Zhaoping metallogenic belt; gold mine; Nanshu; extremely low-resistance shielding area; comprehensive geophysical exploration; mineral exploration engineering; Northwest Jiaodong

Highlights: In the graphite ore coverage area of the Zhaoping metallogenic belt, the comprehensive geophysical exploration method was optimized to overcome the shielding effect of extremely low resistance graphite ore on electromagnetic signals, solve the technical bottleneck of gold ore exploration in the graphite ore coverage area, and achieve good exploration results.

About the first author: GUO Guoqiang, male, born in 1980, senior engineer, mainly engaged in the application and research of new technologies and methods in deep geophysics. E-mail: gsr211@163.com

Fund support: Supported by Shandong Provincial Key Research and Development Program Project (No. 2023CXGC011001) and Shandong Provincial Geological Exploration Projects (Nos. Lukanzi(2016)73, Lukanzi(2012) 12, Lukanzi(2024) 68)

国家新一轮战略找矿行动提出“立足资源安全与产业升级”,以“深部找矿、科技创新”等为勘查目标,实现深部更大找矿突破。自然资源部 2024 年发布了关于装备建设的指导意见,推动高效低成本的勘查技术。山东省在“十四五”规划中提到要利用新装备新方法加强胶东地区(包括招平成矿带)金矿深部勘查(吕古贤等, 2011; 沈远超等, 2011; 张晓飞等, 2012; Kempe et al., 2016; 贺春艳等, 2022a; 解天赐等, 2022; 鲍兴隆等, 2024; 张龙啸等, 2024), 实现深部盲区勘探突破。南墅地区作为此次战略行动中胶西北招平成矿带的重要区域, 浅地表发育有大量的石墨矿(甄世民等, 2015; 王青等, 2018; 申玉科等, 2022; 段留安等, 2024), 受石墨矿的极低阻屏蔽影响, 前期一些有效的物探方法勘探深度明显降低, 不能达到找矿深度要求。本次研究利用新装备及深部协同精细地球物理探测技术(李华等, 2023; 郇恒飞等, 2023; 祝培刚等, 2023), 通过优选石墨矿覆盖区

下金矿勘查地球物理方法, 解决石墨矿覆盖区低阻屏蔽影响的技术瓶颈, 提高石墨矿覆盖区金矿勘探的深度和精度, 精准地圈定出深部金矿发育位置, 为在国家新一轮战略找矿行动中实现该地区深部金矿找矿新突破提供了新的有效的方法思路。

1 地质概况

南墅金矿(石墨矿)位于山东省莱西市南墅镇西部, 是胶西北招平成矿带南段金矿密集分布区。南墅金矿受招平成矿带控制, 断裂带东侧主要出露古元古代荆山群, 石墨矿位于荆山群陡崖组徐村段, 局部出露古元古代莱州岩体及新太古代栖霞序列岩体; 西侧大面积出露中生代玲珑序列二长花岗岩(图 1)。研究区受特殊大地构造环境制约, 岩浆侵入活动剧烈而频繁, 以中生代燕山期侵入岩最发育。研究者(贺春艳等, 2022a; 宋明春等, 2023)普遍认为, 金矿的形成与中生代岩浆活动关系密切, 岩浆活动

是造成成矿流体活动的根本原因。

2 石墨矿下金矿勘探方法优选

2.1 常用物探方法及存在问题

前人在胶西北地区深部金矿勘查区已开展了大量的物探研究,对物探各方法都给予了较好的总结,如常规电法和 EH4 电磁法可以解决深度 1000 m 以浅的金矿勘查;可控源音频大地电磁法 CSAMT、广域电磁法 WFEM、频谱激电法 SIP、天然场源音频大地电磁法 AMT、天然源微动面波法等可以解决深度 2500 m 以浅的金矿勘查;天然场源大地电磁法 MT 可以解决深度 2500 m 以深的金矿勘查(汤井田等, 2015; 石加玉等, 2021; 田宝卿等, 2023; 朱裕振等, 2024)。但招平成矿带南墅地区在深度 120 m 以浅发育大量石墨矿(王帅等, 2017)。由于石墨矿的电阻率极低(约 $n \times 10^{-6} \Omega \cdot m$),对一些电法及电磁法形成了强烈的低阻屏蔽,造成常规电法、EH4、CSAMT 等方法的电磁信号无法向下传播,频带有效响应范围变窄,致使电磁传播基本上止于石墨矿;而 MT 法采用天然场源,频率范围较宽,原则上可以解决大深度勘探问题,但其天然场源的抗噪能力低,在电磁干扰较大的工区(矿区),无法采集到高信噪比的数据。所以,多种原因使上述物探方法无法有效穿透石墨矿进行深部勘查,进而无法勘测隐伏于石墨矿下的金矿床。

2.2 物探方法优选

通过多年实践及各方法特点可知:广域电磁法(WFEM)(王宏宇等, 2020; 李帝铨等, 2021; 黄鑫等, 2022; 郭国强等, 2024)相对于 CSAMT 法发射功率更大,在石墨矿极低电阻率覆盖区,穿透低阻屏蔽能力更强,深部勘探能力更强。地微动法(齐娟娟, 2024)采用天然源面波,相对 MT 法,其不受低阻屏蔽及电磁干扰影响,对层状介质分辨率较高,能够较好地实现深部不同地质体的精细勘探。频谱激电法(SIP)(汪硕等, 2013)为几何测深,通过改变隔离系数,在超低频段作多频视电阻率测量,分析其复电阻率的频谱特性,可分离由导电性引起的近场区电磁谱和由电极化性引起的激电谱,进而求取多个激电谱参数,能准确判断地下异常地质体的导电和电极化性质,相对于常规激电法,其受低阻屏蔽影响较小,通过多参数联合反演,激电异常单一性较强,地形不平、覆盖层厚度变化较大、围岩或盖层导电性不

均匀等因素,一般不会引起假激电异常。

综上所述,由于研究区招平成矿带地表露头点隐伏较浅,成矿带与围岩的密度、磁性及电性差异较大(McFarlane et al., 2011; 孟银生等, 2022; 宋明春等, 2023),可以首先用重磁及联合剖面法(沈金松, 2014; 李洪奎等, 2016)推断其平面走向展布特征;然后围绕招平成矿带开展人工场源超大功率广域电磁法、地微动天然源面波法,大功率频谱激电法。广域电磁法克服了天然场源的随机性和信号微弱的问题,使信号更稳定、更强,不易受外界电磁干扰的影响,摒弃了传统方法中只适用于远区的近似公式,采用适用于全域的公式计算视电阻率,将“近区”“过渡区”和“远区”有机地统一起来,在低阻覆盖区也能准确测量和反演地下介质的电阻率,有效克服了低阻屏蔽层的影响,在同等收发距条件下,比同类电磁法勘探深度更大,能够提供足够的能量穿透一定厚度的低阻屏蔽层,获取深部地质体的信息。被动源地微动法基于介质对天然微动信号的传播特性差异反演地下结构,低阻屏蔽层对微动信号的吸收和散射作用相对较弱,能有效穿透低阻层,获取下部矿体信息。在低阻屏蔽层环境中,其抗干扰优势更突出,可提供稳定可靠的探测数据,该方法无需布置人工震源,避免了因人工震源激发能量在低阻屏蔽层中快速衰减而影响探测效果的问题。大功率频谱激电法发射功率大,信号强,相比传统激电法,在穿透低阻高极化屏蔽层时,更能压制其他干扰信号,保证有效信号的接收和识别,使电磁波在地下低阻高极化介质中传播更远的距离,对低阻高极化屏蔽层下部的矿体,能更精确地确定其位置、规模、形态等。

因此,上述物探方法联合进行垂向勘查,可以较好地规避极低阻屏蔽和电磁干扰,大大加深了勘探深度,较好地解译了石墨矿覆盖区招平成矿带深部的空间展布特征,较精准地圈定了石墨矿覆盖区深部金矿的富集位置,有效解决了石墨矿覆盖区金矿勘查的难题,经钻探验证取得了较好的找矿效果。

3 招平成矿带平面地球物理特征解释

3.1 重磁异常特征

南墅地区古元古代荆山群变质岩系和中生代玲珑序列花岗岩存在较大的密度及磁性差异(Groves, et al., 2018; 毛先成等, 2020; 贺春艳等, 2022b; 宋明春等, 2024),在变质岩系分布区形成重力高异常,在

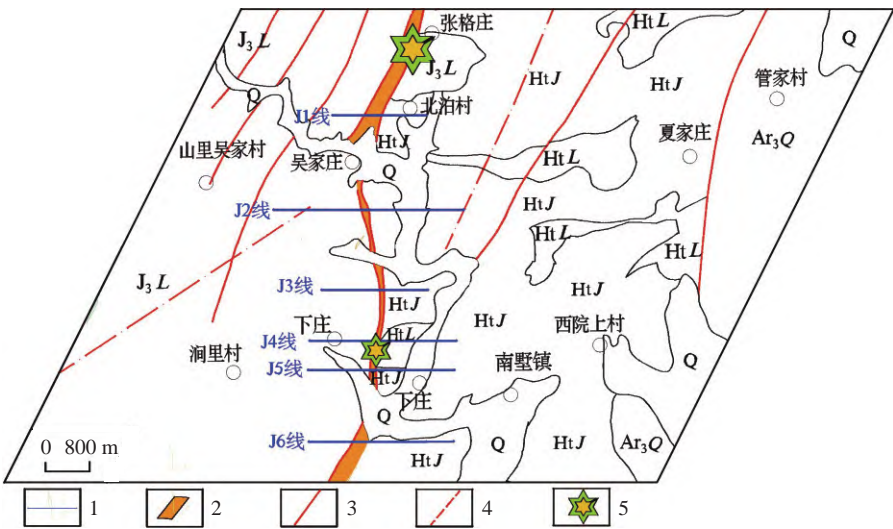


图 1 胶西北南墅地区地质略图

Fig. 1 Geological Sketch of Nanshu area in Northwest Jiaodong

Q—第四系; HtJ—古元古代荆山群; J₃L—玲珑序列岩体; HtL—莱州序列岩体; Ar₃Q—栖霞序列岩体;
1—物探测线; 2—招平成矿带; 3—实测断裂; 4—推断断裂; 5—金矿床(点)

Q—Quaternary; HtJ—Paleoproterozoic Jingshan Group; J₃L—Linglong sequence rock mass; HtL—Laizhou sequence rock mass; Ar₃Q—Qixia sequence rock mass; 1—Geophysical survey line; 2—Zhaoping metallogenic belt; 3—Measured fracture; 4—Inferred fracture; 5—Gold deposit (point)

岩体分布区形成明显的重力低异常。荆山群变质岩系黑云变粒岩、斜长角闪岩、片麻岩、片岩等所含的铁磁性矿物及结构构造有很大差异, 导致磁性极不均匀; 玲珑序列花岗岩类磁性相对较低, 在磁场上一般表现为平稳的低缓磁场特征。因此, 利用重磁异常可以圈定出变质岩和花岗岩类的分布范围, 招平成矿带(图 2 中红色虚线)平面上以典型的重磁梯度带展布, 位于荆山群变质岩与玲珑序列二长花岗岩

的接触破碎带上(图 2)。

3.2 电性异常特征

南墅地区古元古代荆山群变质岩系和中生代玲珑序列花岗岩亦存在较大的电性差异, 其电物性如表 1 所示。从图 3 直流联合剖面曲线的异常特征可以看出, 南墅地区招平成矿带两侧呈截然不同的电场特征, 成矿带西侧视电阻率高, 跳跃性变化, 为玲珑序列花岗岩的反映; 成矿带东侧视电阻率低、平缓

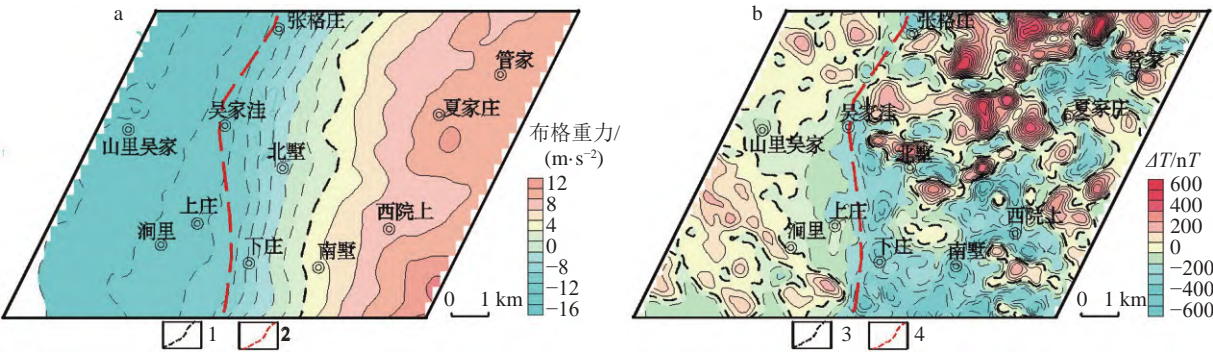


图 2 胶西北南墅地区招平成矿带重磁异常图

Fig. 2 Gravity and magnetic anomaly map of Zhaoping metallogenic belt in Nanshu area, Northwest Jiaodong

a—布格重力; b—磁力 ΔT 化极; 1—布格重力异常等值线; 3— ΔT 磁异常等值线; 2, 4—推断招平断裂带
a—Bouguer gravity; b—Magnetic ΔT polarization. 1—Bouguer gravity anomaly contour line;
3— ΔT magnetic anomaly contour line (right fig); 2, 4—Inferring the Zhaoping Fault Zone

表 1 岩（矿）石电物性
Table 1 Statistical table of rock (mineral) electrical properties

岩性名称	电阻率变化范围/(Ω·m)		主要影响因素
	变化范围	平均值	
石墨黑云变粒岩	10 ⁻¹ ~10 ²	25	石墨含量、片理定向性
大理岩	10 ³ ~10 ⁴	4200	矿物纯度、裂隙含水量
黑云斜长片麻岩	10 ² ~10 ⁴	1840	黑云母含量、混合岩化程度
斜长角闪岩	10 ¹ ~10 ³	480	角闪石含量、硫化物矿化
黑云母花岗岩	10 ³ ~10 ⁵	28800	长石-石英含量、蚀变强度
花岗闪长岩	10 ³ ~10 ⁴	9260	角闪石含量
黄铁矿化蚀变岩	10 ⁰ ~10 ²	36	黄铁矿含量、裂隙发育程度
石墨化蚀变岩	10 ⁻¹ ~10 ²	20	石墨鳞片含量、片理定向性
绢英岩化蚀变岩	10 ² ~10 ³	630	绢云母含量、硫化物矿化

变化,为荆山群变质岩系的反映。招平成矿带位于直联剖视电阻率 ρ_a^A 、 ρ_a^B 两支曲线低阻正交点或低阻“凹”槽部位,即视电阻率跳跃变化的高阻向视电阻率平缓变化的低阻过度梯级带上,该梯级带即为招平成矿带。

4 石墨矿下金矿综合物探勘查应用效果

4.1 广域电磁法视电阻率及地微动法视横波速解释分析

广域电磁法的数据处理与反演方法:兼顾噪声压制、非远场校正、多参数约束三大核心,通过“预处理(去噪、坏道修复)-静态校正(地形校正、近地表低阻层校正)-视电阻率计算-质量控制-正反演迭代-成果解释及地质验证”的流程,最终构建地下电性结构可视化模型(何继善,2010)。

地微动法数据处理及反演方法:通过“预处理(滤波、去除趋势项)-频谱分析(快速傅里叶变换、自功率谱分析)-面波频散曲线提取(空间自相关法、频率-波数法)-质量控制-正反演计算(构建初始模型、选择反演算法)-成果解释(地层结构解释、地质异常识别)-地质验证”的流程,最终构建地下电性结构可视化模型。

由于本次测线 J4 线地表高程变化范围为 94~106 m,最大起伏 12 m,地形坡度及起伏较小,远小于本次探测目标 1000 m 深度,地形对波场影响可以忽略。另外,数据处理时,通过建立地形模型进行正演

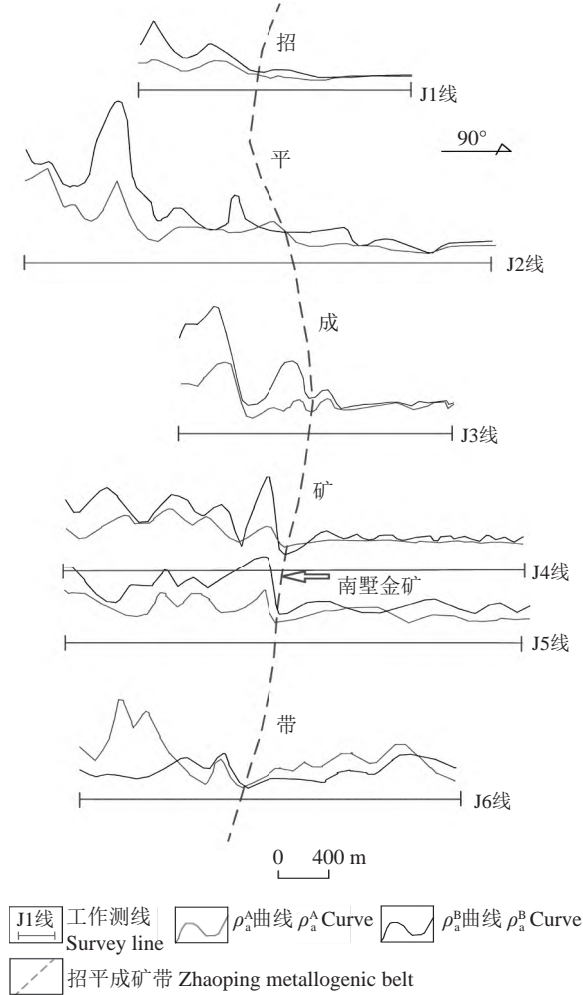


图 3 胶西北南墅地区招平成矿带直联剖各剖面视电阻率曲线图
Fig. 3 Visual resistivity curves of various profiles in the direct current cross section of the Zhaoping metallogenic belt in the Nanshu area, Northwest Jiaodong

模拟,然后从实测数据中减去地形效应的影响。因此,本次反演成果图不再体现地形的影响。

以 J4 剖面为例,在广域电磁剖面(图 4-a)和地微动剖面(图 4-b)横向 460 点附近均存在一明显的向东倾的视电阻率高低阻电性界面和视横波高低速界面。界面左侧下盘表现为高视电阻率、高视横波波速,界面右侧上盘表现为低视电阻率、低视横波波速。结合前述岩石电物性特征、实地地质勘查及已知钻孔资料,推断左侧为玲珑序列二长花岗岩的反映,右侧为荆山群变质岩的反映。界面左右两侧电性及波速差异明显,为典型的断裂带异常特征,经综合分析,与已知招平成矿带的异常特征一致,推断为招平成矿带(F1),其主断裂面大致沿岩体与变质岩

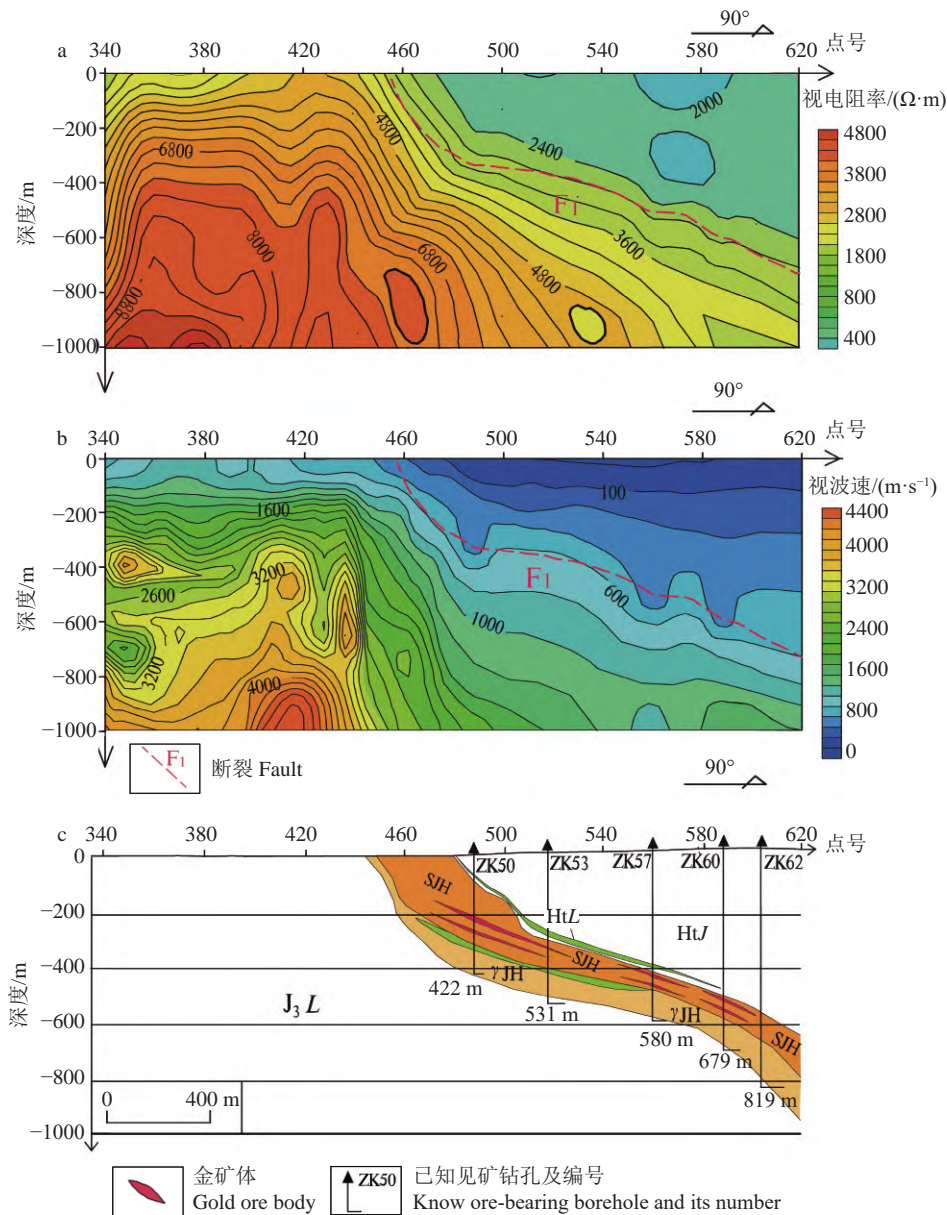


图 4 胶西北南墅地区招平成矿带 J4 线电阻率及波速等值线断面图

Fig. 4 Sectional map of resistivity and wave velocity contour lines for Line J4 in the Zhaoping metallogenic belt in Nanshu area, Northwest Jiaodong

a—视电阻率断面图; b—视横波速度断面图; c—地质剖面图; HtJ—古元古代荆山群; J₃L—玲珑序列岩体; HtL—莱州序列岩体; SJH—黄铁绢英岩化碎裂岩; γJH—黄铁绢英岩化花岗岩

a—Visual resistivity cross-sectional diagram; b—Transverse wave velocity cross-section diagram; c—Geological profile map.
HtJ—Paleoproterozoic Jingshan Group; J₃L—Linglong sequence rock mass; HtL—Laizhou sequence rock mass;
SJH—Pyrite-sericitization cataclastic rock; γJH—Pyrite-sericitization granite

地层接触界线分布,该成矿带沿倾向呈陡缓交替变化特征,推断招平成矿带视电阻率及视波速等值线起伏变化较大、间距变大、陡缓变化较大部位为成矿有利部位,即金矿体主要集中分布于梯级带上梯度变

化较大的部位,该变化最大的部位即图 4 中 (470~500) 点/埋深 (-200~-400) m、(550~570) 点/埋深 (-400~-550) m、(580~600) 点/埋深 (-450~-600) m, 广域电磁法和地微动法金矿成矿有利部位一一对应。

4.2 频谱激电法充电率和频率相关系数解释分析

广域电磁法和地微动法解决了石墨矿覆盖区勘探深度的问题(图 4), 石墨矿下(最大埋深 120 m)视电阻率及视横波波速反演等值线断面图形态反映良好(图 4-a, b), 经钻孔验证(图 4-c), 成矿部位与电阻率及波速等值线梯度变化较大部位一一对应。但这 2 种方法只是推断成了成矿带, 间接圈定成矿相对有利区, 其成矿具体深度及规模难以准确确定, 因此, 在 2 种方法初步推断成果的基础上, 本次利用大功率频谱激电测深法进一步验证, 该方法可在超低频段作多频复电阻率测量, 通过研究复电阻率的频谱特性, 确定成矿的具体位置、深度、相对规模等地质问题。

以 J4 剖面为例(图 5), 由上而下分别为频谱激电充电率(m_a %)断面图(图 5-a)、频率相关系数(c_a)断面图(图 5-b)及地质剖面图(图 5-c), 具体解释如下。

充电率是反映勘探体积中极化物质体积分含量的物性参数, 其大小直接反映了勘探体积内极化物质体积分含量的多寡, 极化物质含量与 Au 品位呈正相关关系。由充电率断面图(图 5-a)可以看出, 在横向 440~500 点, 纵向上存在 1 条明显向东倾的高充电率条带“串珠”状异常带, 即招平成矿带, 岩石经矿化蚀变后, 充电率明显升高, 一般在 5% 以上, 蚀变矿化强烈的富矿石则更高, 充电率达 12% 以上; 玲珑序列岩体和荆山群变质岩的充电率相对招平成矿蚀变异常带明显降低, 一般在 5% 以下。招平成矿蚀变异常带倾角为 30°~60°, 局部存在膨缩现象, 充电率高值异常部位与上述广域电磁法和地微动法圈定的成矿有利区基本一致, 在横向 485 点、555 点、585 点, 纵向上的“珠”状膨大部位, 经钻孔 ZK50、ZK57 及 ZK60 验证存在 2 层厚大矿体, 其厚度上层略大于下层, 而在 515 点和 600 点的纵向上“串珠”状的收缩部位, 经钻孔 ZK53、ZK62 验证无矿或呈薄层矿发育(图 5-c)。

频率相关系数表征了勘探体积内极化物质的分布情况, 极化物质呈单一和均匀性分布时, 其值较高, 在矿化体赋存部位其值较低。由频率相关系数断面图(图 5-b)看, 在横向 440~500 点, 纵向上存在 1 条明显东倾的条带“串珠”状低值异常带, 该异常带即为招平成矿带, 其相关系数数值明显变低, 小于 0.5, 最低可到 0.1, 与上述充电率高值异常及“珠”状位置基本上——对应。招平成矿带围岩玲珑序列岩

体和荆山群变质岩的相关系数相对较高, 一般大于 0.5。金矿体主要分布于成矿带主裂面的黄铁绢英岩化碎裂岩带内(图 5-c)。

综上所述, 在广域电磁法及地微动法综合解译招平成矿带垂向展布特征的基础上, 进一步布设大功率频谱激电法, 按照 1000 m 的勘探深度要求, 野外布设极需兼顾浅部和深部 2 个窗口: 浅部第 1 窗口参数为发射偶极矩 $AB=100$ m, 接收偶极矩 $MN=50$ m, 隔离系数 $n=1$, 接收道数为 9 道; 深部第 2 窗口参数为发射偶极矩 $AB=800$ m, 接收偶极矩 $MN=100$ m, 隔离系数 $n=4.5$, 接收道数为 12 道。利用其充电率和频率相关系数 2 个反演参数相互佐证, 精准定位了招平成矿蚀变带及金矿体的空间发育位置、深度及相对规模(Allibone et al., 2002; Campos et al., 2021; 吕承训, 2024), 提高了解译的准确性、可靠性, 实现了石墨矿低阻屏蔽下精细找矿的目的, 达到了较好的效果。

5 结 论

(1) 大功率广域电磁法、地微动面波法、大功率频谱激电法分别采用视电阻率、视波速、视充电率/相关系数等结果参数, 多参数组合, 相互佐证, 优势互补, 较好地克服了石墨矿覆盖区极低阻屏蔽及电磁干扰的影响, 在常规重磁及联剖法推断招平成矿带平面展布特征的基础上, 对招平成矿带进行了垂向勘查, 确定了其垂向展布特征, 圈定了金矿激电异常, 方法准确得当, 应用效果明显。

(2) 研究区玲珑序列岩体高阻岩层视横波速为高值, 荆山群变质岩低阻岩层视横波速为低值, 金矿体位于高低阻及高低速过渡梯级带上, 该梯级带即为招平成矿带, 据钻探揭露情况可知, 在招平成矿带上, 电阻率及波速等值线波动较大部位或拐弯转折部, 高充电率及低频率相关系数“串珠”状异常的“珠”状部位为金矿找矿的重点部位。

(3) 通过本次研究成果与钻探验证对比情况可知, 充电率和频率相关系数的“珠”状异常部位——对应, 该部位发育 2 层矿, 上层矿厚度整体略大于下层矿, “珠”的大小决定了矿体厚度, 即“珠”越膨大, 矿体越厚; 非“珠”状部位基本不成矿或见一极薄层矿。

致谢: 谨向各审稿专家致以诚挚谢意, 感谢他们提出的宝贵建设性意见, 使本文学术质量提升到更高台阶。

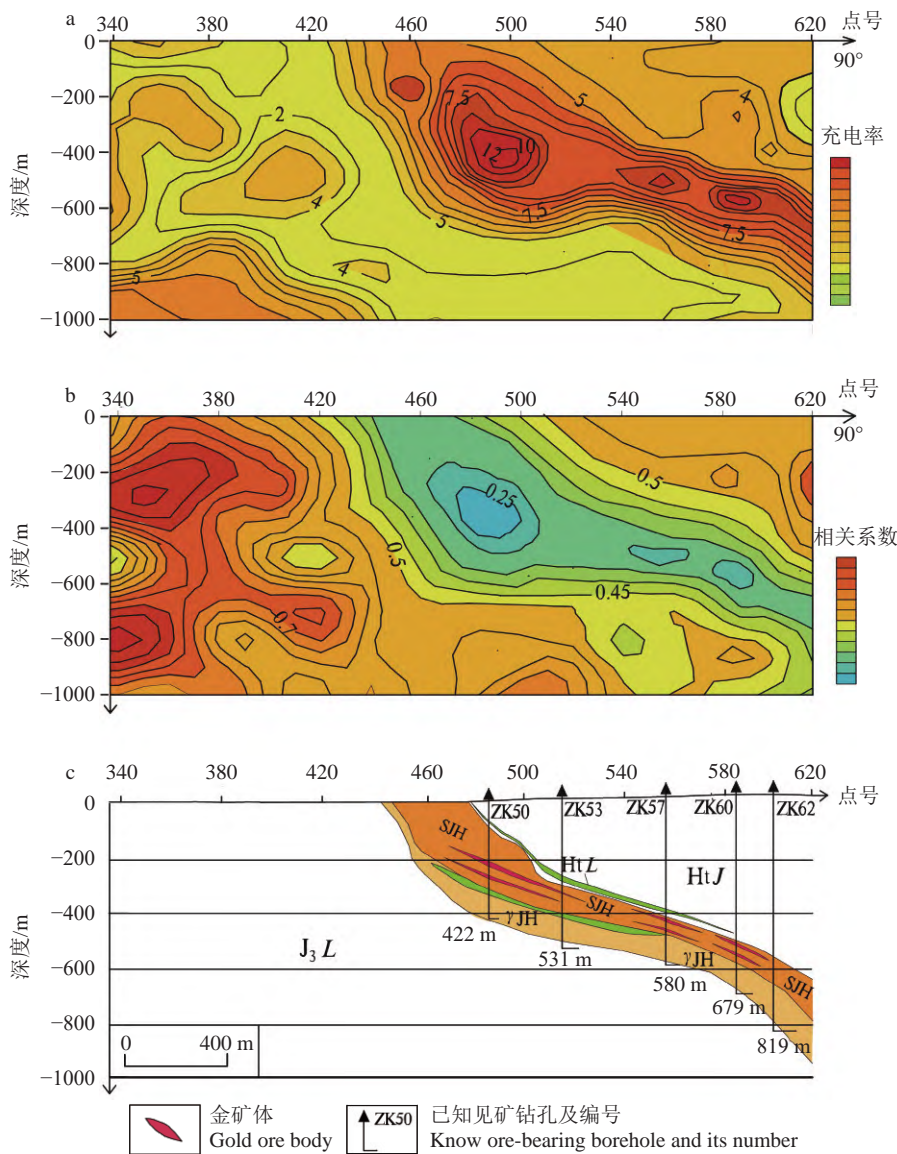


图 5 胶西北南墅地区招平成矿带 J4 线频谱激电综合反演成果图

Fig. 5 Comprehensive inversion result map of spectral induced polarization for Line J4 in the Zhaoping metallogenic belt in Nanshu area, Northwest Jiaodong

a—充电率断面图; b—频率相关系数断面图; c—地质剖面图; HtJ—古元古代荆山群; J₃L—玲珑序列岩体; HtL—莱州序列岩体; SJH—黄铁绢英岩化碎裂岩; γJH—黄铁绢英岩化花岗岩

a—Charging rate cross-sectional diagram; b—Frequency correlation coefficient cross-sectional diagram; c—Geological profile map.
HtJ—Paleoproterozoic Jingshan Group; J₃L—Linglong sequence rock mass; HtL—Laizhou sequence rock mass;
SJH—Pyrite-sericitization cataclastic rock; γJH—Pyrite-sericitization granite

References

Allibone A H, McCuaig T C, Harris D, et al. 2002. Structural controls on gold mineralization at the Ashanti gold deposit, Obuasi, Ghana[M]. Society of Economic Geologists Special Publication, 9: 29–33.
Bao X L, Qian J P, Sun J L, et al. 2024. Ore-controlling structure and exploration target of Xiejiagou gold deposit in northwest Jiaodong area[J]. Geological Bulletin of China, 43(5): 680–691(in Chinese with

English abstract).
Campos L D, Oliveira C G, Ganade C E, et al. 2021. Metallogenesis of the Rhyacian Lavra Velha gold-rich IOCG deposit in the São Francisco Craton, Brazil[J]. Ore Geology Reviews, 134: 104–148.
Duan L A, Wang J T, Guo Y C, et al. 2024. Discovery of Zhaoyuan Tengjia super-large gold deposit (50 t) in Zhaoping metallogenic belt in the northwest Jiaodong Peninsula[J]. Geology in China, 51(4):

- 1441–1442(in Chinese with English abstract).
- Groves D I, Santosh M, Goldfarb R J, et al. 2018. Structural geometry of orogenic gold deposits: Implications for exploration of world-class and giant deposits[J]. *Geoscience Frontiers*, 9(4): 1163–1177.
- Guo G Q, Li Y D, Wang Y, et al. 2024. Fine-scale prospecting targets of skarn iron deposits in the Pandian gravity-magnetic anomaly zone of northwestern Shandong Province: Insights from deep prospecting using the wide-field electromagnetic method[J]. *Geophysical and Chemical Exploration*, 48(2): 327–333(in Chinese with English abstract).
- He C Y, Wang Y, Wang H J, et al. 2022a. 3D geological modeling of Jiaojia-Sanshandao fault zone in Jiaodong based on comprehensive geophysical constraints: metallogenic characteristics and implications for ore prospecting[J]. *Geological Bulletin of China*, 41(6): 936–945(in Chinese with English abstract).
- He C Y, Yao Z, Guo G Q, et al. 2022b. Deep structural features of the Jiaobei terrane of Jiaodong and the North Sulu orogenic belt: the inspiration from deep exploration of the geophysics[J]. *Progress in Geophysics*, 37 (4): 1392–1404(in Chinese with English abstract).
- He J S. 2010. Research on Wide Area Electromagnetic Sounding Method[J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 41(3): 1065–1072(in Chinese with English abstract).
- Huang X, Wang Y J, Song Q, et al. 2022. Wide field electromagnetic exploration and prospecting of metallogenic structures in Daliuhang gold field, the north of Jiaodong[J]. *Geological Bulletin of China*, 41(6): 1107–1120(in Chinese with English abstract).
- Kempe U, Graupner T, Seltmann R, et al. 2016. The Muruntau gold deposit(Uzbekistan) –A unique ancient hydrothermal system in the southern Tien Shan[J]. *Geoscience Frontiers*, 7(3): 495–528.
- Li D Q, Xiao J J, Zhang J F, et al. 2021. Comparison of application effects of WFEM and CSAMT in water-rich area of Xinyuan Coal Mine[J]. *Geophysical and Chemical Exploration*, 45(5): 1359–1366(in Chinese with English abstract).
- Li H K, Li D P, Geng K, et al. 2016. The Yanshanian magmatic activity and its tectonic environment in the Jiaodong region[J]. *Geological Journal*, 91(1): 163–179(in Chinese with English abstract).
- Li H, Wang D H, Zhang W, et al. 2023. The application effect of geophysical method in fine exploration of urban geological structure and study of optimal combination method: A case study of Tianfu New Area in Chengdu, Sichuan Province[J]. *Geology in China*, 50 (6): 1691–1704(in Chinese with English abstract).
- Lv C X, Wang J P, Chen X L. 2024. Discussion on the method for calculating diagenetic and metallogenic depths in the Jiaodong gold deposit[J]. *Geoscience*, 38(4): 910–921(in Chinese with English abstract).
- Lv G X, Sun Z F, Zhao H, et al. 2011. Geological characteristics, mineralization laws and deep prediction of Jiaodong gold field[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 31(S1): 969–970(in Chinese).
- Mao X C, Wang Q, Chen J, et al. 2020. Three-dimensional modeling of deep metallogenic structure in northwestern Jiaodong Peninsula and its gold prospecting significance[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 41(2): 166–178(in Chinese with English abstract).
- McFarlane C R M, Mavrogenes J, Lentz D, et al. 2011. Geology and intrusion-related affinity of the Morila Gold Mine, Southeast Mali[J]. *Economic Geology*, 106: 727–750.
- Meng Y S, Zhang R Z, Tang L, et al. 2022. Integrated geophysical exploration of the hidden gold deposit in Banbidian, Jiaodong Peninsula[J]. *Geological Bulletin of China*, 41(6): 1095–1106(in Chinese with English abstract).
- Qi J J. 2024. Critical factors in microtremor-based exploration at a depth of thousands of meters[J]. *Geophysical and Chemical Exploration*, 48(3): 777–785(in Chinese with English abstract).
- Shen J S. 2014. General Geophysical Exploration Tutorial – Heavy, Magnetic, and Electrical Exploration Methods[M]. Petroleum Industry Press(in Chinese with English abstract).
- Shen Y C, Li H M, Liu T B, et al. 2011. Types of gold mineralization of Jiaojia type's gold deposits in Jiaodong District, Shandong Province, and their importance of studying[J]. *Geology & Exploration*, 31(1): 11–13(in Chinese with English abstract).
- Shen Y K, Guo T, Lv Z C, et al. 2022. Analysis on the ore-controlling structures and prospecting in the Dayingezhuang gold deposit, Zhaoyuan, Shandong Province[J]. *Geology in China*, 49(1): 215–225(in Chinese with English abstract).
- Shi J Y, Guo P, Li Y, et al. 2021. Research and implementation of key technologies of spectral induced polarization instruments[J]. *Geophysical and Chemical Exploration*, 45(6): 1475–1481(in Chinese with English abstract).
- Song M C, Hu W X, Li J, et al. 2023. Metallogenic series of Jiaodong type gold deposits and its prospecting cases[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 44(5): 781–796(in Chinese with English abstract).
- Song M C, Wang H J, Liu H B, et al. 2024. Deep characteristics of ore-controlling faults in Jiaoxibe gold deposits and its implications for prospecting: Evidence from geophysical surveys[J]. *Geology in China*, 51(1): 1–16(in Chinese with English abstract).
- Tang J T, Ren Z Y, Zhou C, et al. 2015. Overview of shallow frequency domain electromagnetic exploration methods[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 58(8): 2681–2705(in Chinese with English abstract).
- Tian B Q, Ding Z F. 2023. Review and prospect prediction for microtremor survey method[J]. *Progress in Geophysics*, 6(3): 1306–1316(in Chinese with English abstract).
- Wang H Y, Li D Q, Liu J X, et al. 2020. Application of wide-field electromagnetic method in the detection of oil-rich enrichment areas in the southwestern margin of the Ordos basin[J]. *Progress in Geophysics*, 35(3): 1038–1047(in Chinese with English abstract).
- Wang Q, Cheng D J, Cao R, et al. 2018. Geological characteristics and metallogenic prospects of Nanshu gold deposit in the south of Zhaoping fault zone[J]. *Shandong Land and Resources*, 34(7): 1441–1442(in Chinese with English abstract).

- 14–19(in Chinese with English abstract).
- Wang S, Liu S M, Yu Y, et al. 2017. Geological characteristics and prospecting target optimization of graphite deposits in Laixi-northern Pingdu area in Shandong Province[J]. Shandong Land and Resources, 33(12): 30–36(in Chinese with English abstract).
- Wang S, Yu X. 2013. Preliminary study on the application of spectral induced polarization method in uranium exploration[J]. Geological Review, 59(Supp.): 972–973(in Chinese).
- Xie T C, Dai C G, Li R X, et al. 2022. New understandings of 3D feature and mineralization enrichment regularity in the Dayingezhuang-Caojiawa gold deposit of Jiaodong Peninsula[J]. Geological Bulletin of China, 41(6): 986–992(in Chinese with English abstract).
- Xun H F, Sun S L, Li Y F, et al. 2023. Application of non seismic comprehensive geophysical prospecting method in oil and gas geological survey in Niuyingzi area, western Liaoning Province[J]. Geological Bulletin of China, 42(6): 1035–1046(in Chinese with English abstract).
- Zhang L X, Yang L Q, Yang W, et al. 2024. Migration and emplacement of ore-forming fluids and their structural controlling mechanisms: An example from Jiaojia gold belt in Jiaodong Peninsula[J]. Geoscience, 38(4): 873–891(in Chinese with English abstract).
- Zhang X F, Sun A Q, Niu S Y, et al. 2012. Analysis of ore-forming structures and ore controlling effects in Jiaojia gold field in Jiaodong[J]. Gold Science and Technology, 26(3): 18–22(in Chinese with English abstract).
- Zhen S M, Ye T Z, Pang Z S, et al. 2015. A preliminary analysis of the structural Ore controlling laws of gold deposits in the Northwest of Jiaozhou[J]. Geological Review, 61(Supp.): 596–597(in Chinese).
- Zhu P G, Li X Z, Zhang W J, et al. 2023. The "trinity" prospecting prediction geological model and demonstration of deep prospecting of Jiaojia gold field in the Jiaodong area[J]. Geological Bulletin of China, 42(6): 909–920(in Chinese with English abstract).
- Zhu Y Z, Zhang W Y, Shao G H, et al. 2024. Application of distributed 3D wide field electromagnetic method in the exploration of high-grade iron ore in the thick covered area of Litun in Qihe–Yucheng, Shandong Province[J]. Geological Bulletin of China, 43(9): 1555–1564(in Chinese with English abstract).
- 14–19(in Chinese with English abstract).
- 贺春艳, 姚铮, 郭国强, 等. 2022b. 胶东胶北地体与北苏鲁造山带深部结构特征——来自地球物理深部探测的启示[J]. 地球物理学进展, 37(4): 1392–1404.
- 何继善. 2010. 广域电磁测深法研究[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 41(3): 1065–1072.
- 黄鑫, 王勇军, 宋倩, 等. 2022. 胶东北部大柳行金矿田成矿构造的广域电磁法勘查及对深部找矿的指示[J]. 地质通报, 41(6): 1107–1120.
- 李帝铨, 肖教育, 张继峰, 等. 2021. WFEM 与 CSAMT 在新元煤矿富水区探测效果对比[J]. 物探与化探, 45(5): 1359–1366.
- 李洪奎, 李大鹏, 耿科, 等. 2016. 胶东地区燕山期岩浆活动及其构造环境[J]. 地质学报, 91(1): 163–179.
- 李华, 王东辉, 张伟, 等. 2023. 地球物理方法在城市地质结构精细化探测中最优方法组合研究——以成都市天府新区为例[J]. 中国地质, 50(6): 1691–1704.
- 吕承训, 王建平, 陈小龙. 2024. 胶东金矿成岩成矿深度测算方法探讨[J]. 现代地质, 38(4): 910–921.
- 吕古贤, 孙之夫, 赵海, 等. 2011. 胶东金矿田地质特征、成矿规律与深部预测[J]. 矿物学报, 31(S1): 969–970.
- 毛先成, 王琪, 陈进, 等. 2020. 胶西北金矿集区深部成矿构造三维建模与找矿意义[J]. 地球学报, 41(2): 166–178.
- 孟银生, 张瑞忠, 汤磊, 等. 2022. 胶东半壁店隐伏金矿床综合地球物理探测[J]. 地质通报, 41(6): 1095–1106.
- 齐娟娟. 2024. 基于微动的千米深度勘探关键影响因素[J]. 物探与化探, 48(3): 777–785.
- 沈金松. 2014. 普通物探教程-重、磁、电勘探方法[M]. 石油工业出版社.
- 沈远超, 李厚民, 刘铁兵, 等. 2011. 胶西北焦家式金矿化类型及研究意义[J]. 地质与勘探, 31(1): 11–13.
- 申玉科, 郭涛, 吕志成, 等. 2022. 山东招远大尹格庄金矿控矿构造解析与找矿预测[J]. 中国地质, 49(1): 215–225.
- 石加玉, 郭鹏, 李勇, 等. 2021. 频谱激电测量仪器关键技术研究及实现[J]. 物探与化探, 45(6): 1475–1481.
- 宋明春, 胡文萱, 李杰, 等. 2023. 胶东型金矿成矿系列及找矿案例[J]. 地球学报, 44(5): 781–796.
- 宋明春, 王洪军, 刘洪波, 等. 2024. 胶西北金矿控矿断裂深部特征及对找矿的启示——来自地球物理探测的证据[J]. 中国地质, 51(1): 1–16.
- 汤井田, 任政勇, 周聪, 等. 2015. 浅部频率域电磁勘探方法综述[J]. 地球物理学报, 58(8): 2681–2705.
- 田宝卿, 丁志峰. 2023. 微动探测方法研究进展与展望[J]. 地球物理学进展, 6(3): 1306–1316.
- 王宏宇, 李帝铨, 柳建新, 等. 2020. 广域电磁法在鄂尔多斯盆地西南缘含油富集区探测中的应用[J]. 地球物理学进展, 35(3): 1038–1047.
- 王青, 程东江, 曹瑞, 等. 2018. 招平成矿带南段南墅金矿地质特征及成矿远景[J]. 山东国土资源, 34(7): 14–19.
- 王帅, 刘述敏, 于洋, 等. 2017. 山东省平度—莱西北部地区石墨矿地质特征及找矿靶区优选[J]. 山东国土资源, 33(12): 30–36.
- 汪硕, 喻翔. 2013. 频谱激电法在铀矿勘查领域应用的初探[J]. 地质论评, 59(增刊): 972–973.

附中文参考文献

- 鲍兴隆, 钱建平, 孙俊磊, 等. 2024. 胶西北地区谢家沟金矿床构造控矿规律及找矿方向[J]. 地质通报, 43(5): 680–691.
- 段留安, 王建田, 郭云成, 等. 2024. 胶西北招平成矿带新发现一处特大型金矿床——招远滕家金矿(50 t)[J]. 中国地质, 51(4): 1441–1442.
- 郭国强, 李亚东, 王阳, 等. 2024. 鲁西北潘店重磁异常带矽卡岩型铁矿精细找矿方向——来自广域电磁法深部找矿的启示[J]. 物探与化探, 48(2): 327–333.
- 贺春艳, 王阳, 王洪军, 等. 2022a. 基于综合地球物理约束的胶东焦家-三山岛断裂带三维地质建模: 成矿特征与找矿启示[J]. 地质通报,

- 解天赐, 戴长国, 李瑞翔, 等. 2022. 胶东大尹格庄-曹家洼金矿床三维空间特征及矿化富集规律新认识[J]. 地质通报, 41(6): 986–992.
- 郇恒飞, 孙守亮, 李永飞, 等. 2023. 非震综合物探方法在辽西牛营子地区油气地质调查中的应用[J]. 地质通报, 42(6): 1035–1046.
- 张龙啸, 杨立强, 杨伟, 等. 2024. 成矿流体运移与就位及其构造控制机理: 以胶东焦家金矿带为例[J]. 现代地质, 38(4): 873–891.
- 张晓飞, 孙爱群, 牛树银, 等. 2012. 胶东焦家金矿田成矿构造及控矿作用分析[J]. 黄金科学技术, 26(3): 18–22.
- 甄世民, 叶天竺, 庞振山, 等. 2015. 胶西北地区金矿床构造控矿规律浅析[J]. 地质论评, 61(增刊): 596–597.
- 祝培刚, 李秀章, 张文佳, 等. 2023. 胶东焦家金矿田"三位一体"找矿预测地质模型与深部找矿示范[J]. 地质通报, 42(6): 909–920.
- 朱裕振, 张文艳, 邵贵航, 等. 2024. 分布式三维广域电磁法在山东齐河—禹城李屯厚覆盖区富铁矿勘查中的应用[J]. 地质通报, 43(9): 1555–1564.

《地质通报》第 44 卷第 10 期要目预告

- 川西南雷波安寨坪地区萤石矿成因分析: 稀土元素地球化学及流体包裹体的制约 李佐强等
- 川西南马边地区萤石矿床成矿物质来源及对萤石区域找矿的启示 张航飞等
- 四川省德昌-会理地区锡多金属矿床成矿时代与成因 邹婧等
- 川南煤田古叙矿区龙潭组煤中稀土元素研究 阳伟等
- 攀西地区铜厂沟离子型稀土矿点的发现及意义 侯谦等
- 兰坪金顶超大型铅锌矿田深部地质结构与成矿潜力 薛力鹏等
- 龙门山构造带北段早寒武世毛湾里锰矿床含矿岩系黄铁矿形态学特征及对沉积环境与成矿机理的制约 万平益等
- 四川张家坪子金矿床金和载金矿物化学成分及其地质意义 陈雨萌等
- 滇西北安乐铅锌矿床成因: 来自闪锌矿原位主微量元素和 S 同位素的证据 王利等
- 甘肃省天水地区地热研究综述 郭东宝等
- 基于三维数值仿真的岩质边坡失稳模式及加固研究——以乐西高速公路典型边坡为例 杨俊锋等
- 白鹤滩水电站库区象鼻岭-野猪塘段滑坡隐患遥感识别方法 廖泽源等
- 藏东贡觉地区岩质滑坡多发性研究——以色拉变形体为例 周金禄等
- 新疆北山启鑫岩体地幔源区性质及找矿启示: 来自橄榄石成分的制约 庞振阵等
- 反应输运数值建模对矽卡岩矿床分带性的研究——以青藏甲玛斑岩-矽卡岩型铜多金属矿床为例 常成等